

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Уральский государственный педагогический университет»
Институт математики, физики, информатики и технологий
Кафедра технологии и экономики

**Оценка эффективности внедрения инновационного проекта на
металлургическое предприятие**

Выпускная квалификационная работа

Квалификационная работа
допущена к защите
Зав. кафедрой
Чикова Ольга Анатольевна

дата

подпись

Исполнитель:
Сергеева Юлия Игоревна,
Обучающаяся ИТТ-1501
группы

подпись

Руководитель:
Чикова Ольга Анатольевна,
Доктор физико-
математических наук,
зав. кафедрой технологии и
экономики

подпись

Екатеринбург 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	7
1.1. Актуальность темы исследования.....	7
1.2. Современные представления о суперсплавах на основе никеля	11
1.3. Сведения об исследуемом материале	14
1.3.1. Основные жаропрочные сплавы на никелевой основе	14
1.3.2. Строение, фазовый состав и теплофизические свойства сплава ХН60ВТ	18
1.4. Сведения о защитном покрытии – металлический порошок ПВ-НХ16Ю6Ит.....	23
1.5. Теоретические основы экспериментального метода, использованного в работе – определения модуля Юнга E и твердости H методом наноиндентирования	26
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	29
2.1. Результаты металлографического исследования микроструктуры суперсплава Ni-25%Cr-15%W с напылением порошка Ni-Cr-Al	29
2.2. Результаты измерения механических свойств – твердости и модуля Юнга.....	30
2.3. Расчет адгезии покрытия и подложки	32
3. ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	34
3.1. Расчет затрат на проведение научно – исследовательской работы	34
3.1.1. Целесообразность расчетов затрат на проведение научно-исследовательской работы.....	34
3.1.2. Затраты на материалы	34
3.1.3. Затраты на электроэнергию	35

3.1.4. Затраты на амортизацию	37
3.1.5. Затраты на заработную плату	38
3.1.6. Страховые взносы и расходы по обязательному страхованию персонала от несчастных случаев и профзаболеваний	39
3.2. Экономическая оценка эффективности исследования	40
3.2.1. Потенциальные потребители результатов исследования	40
3.2.3. Анализ аналогичных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	42
3.2.4. SWOT-анализ	43
3.2.5. Оценка готовности проекта к коммерциализации	46
3.2.6. Оценка сравнительной эффективности исследования	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ	52

ВВЕДЕНИЕ

XXI век – век стремительного развития технологий. Инновационные проекты затрагивают практически все сферы жизни, одной из которых естественным образом является промышленность и промышленные технологии. Главным образом они направлены на решение каких-либо все чаще встречающихся сложных технических или экономических проблем.

Одной из таких проблем современности является коррозия металлов и их защита от нее, а также от влияния агрессивных условий окружающей среды, в которой используют детали из этого металла.

Ряд коррозионных проблем остается открытым, тем самым тормозит технический прогресс во многих отраслях промышленности. В промышленно развитых странах, имеющих крупнейший металлофонд, это приобрело особую актуальность. Особенно в последние годы, когда в промышленности используют высокопрочные материалы в условиях особо агрессивных сред, высоких температур и давлений. В этих условиях значительно возрос удельный вес потерь, вызываемых такими опасными формами коррозии, как коррозионное растрескивание, межкристаллитная коррозия, питтинг и др.[1]

Огромны экономические потери от коррозии металлов. По оценкам специалистов различных стран эти потери в промышленно развитых странах составляют от 2 до 4 % валового национального продукта. При этом потери металла, включающие массу вышедших из строя металлических конструкций, изделий, оборудования, составляют от 10 до 20 % годового производства стали. [1]

Поэтому актуальна разработка эффективных средств противокоррозионной защиты, а также методов оценки сцепления металлов и покрытий, которые позволят не только уменьшить потери металла и средств, но и снизить металлоемкость конструкций и сооружений, увеличить их грузоподъемность, уменьшить расход топливно-энергетических ресурсов при

строительстве и эксплуатации, увеличить эксплуатационный период и в целом уменьшить себестоимость и повысить рентабельность объектов техники.

Целью работы является оценка эффективности внедрения инновационного проекта – *метод оценки адгезии напыленного порошка ПВ-НХ16Ю6Ит на трубы из сплава ХН60ВТ для дальнейшей их защиты от истирания частицами золы и от коррозии*, на современное Российское металлургическое производство.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи исследования:**

- рассмотреть химико-физические свойства данных материалов;
- провести экспериментальные исследования, на основе которых возможно сформировать новый метод;
- сформировать расчет затрат на проведение научно-исследовательской работы;
- оценить экономическую составляющую экспериментального исследования;
- оценить готовность проекта к коммерциализации.

Объект исследования: инновационный проект – методика оценки и последующей аккредитации адгезии защитного покрытия по данным экспериментальных исследований.

Предмет исследования: образцы, отобранные от труб из сплава ХН60ВТ после нанесения защитного покрытия путем газоплазменного напыления металлического порошка марки ПВ-НХ16Ю6Ит в защитной среде из смеси азота с аргоном с помощью плазмотрона ПП-25

В ходе написания работы, применялись методы системного изучения объекта и предмета исследования, экспериментальные методики, осуществляемые во время производственной (преддипломной) практики. Особое внимание уделялось смыслу и полноте материала, обоснованности

положений и выводов, их критической оценке. Теоретической базой исследования является учебная, периодическая печать, специальная литература по проблеме.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения и библиографического списка. Изложена на 54 страницах, содержит 17 таблиц и 4 рисунка.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Актуальность темы исследования

Металлургия - одна из несущих конструкций российской экономики. Какую бы государственную задачу в области экономического развития страны ни взяли, развитие металлургии, будет ее необходимым условием.[2]

Формированию металлургического комплекса в России ещё с незапамятных времен давалась основная роль. Далеко не беспричинно Петр I предоставил крупные привилегии роду купца Демидова с целью постройки металлургических заводов на Урале. Петр I осознавал, что в отсутствии металлургии нельзя гарантировать влияние России и её подготовленность к обороне. В самодержавной России с целью ее формирования обширно привлекались зарубежные средства — английские, немецкие, французские, бельгийские.[2]

В Советском Союзе кроме того первостепенными вопросами развития общенародного хозяйства были формирование и постройка новейших металлургических предприятий, так как без этого почти неосуществима нормальная деятельность целой промышленно-хозяйственной области. Продукт данного комплекса нужен абсолютно всем: и машиностроителям с целью изготовления станков, оснащения разного назначения, машин, гражданских и военных самолетов, боевых кораблей и гражданских судов, и строителям для возведения жилых зданий и производственных строений, и газовикам с целью обустройства газовых месторождений и прокладки газопроводов, и нефтяному комплексу с целью схожих работ. В целом, от швейной иглки и вплоть до космического корабля — такой спектр применения продукта всего металлургического комплекса России.

Современная черная металлургия — одна из основных сфер тяжелой промышленности. Ее продукт является базой для формирования машиностроения и металлообработки, строительства, а кроме того находит

обширное использование в многочисленных секторах экономики народного хозяйства. Концепция производств черных металлов включает целый процесс от добычи и подготовки материала, топлива, вспомогательных материалов вплоть до выпуска проката с продуктами последующего передела. Состав металлургии обширен и разнообразен, в него входит добыча, переработка и агломерация железных, марганцевых руд; изготовление чугуна, доменных ферросплавов, стали и проката; изготовление электроферросплавов; вторичное перераспределение черных металлов; коксование угля; изготовление огнеупоров; добыча вспомогательных материалов (флюсовых известняков, магнезита и др.); производство металлургических продуктов производственного направления. Черная металлургия Российской Федерации выделяется массовостью и значительным сосредоточением производства, большими масштабами применения сырья и топлива, близким взаимодействием абсолютно всех звеньев металлургического передела и его смежников, обширной переработкой промышленных отходов.

Одними из крупнейших потребителей продукции черной металлургии являются машиностроение и металлообработка, строительная промышленность, железнодорожный транспорт. Тесно черная металлургия сопряжена с легкой и химической промышленностью.

В структуру черной металлургии входят основные отрасли:

- добыча и обогащение руды (хромитовая, железная, марганцевая);
- добыча и обогащение нерудного сырья (тугоплавкие глины, флюсовые известняки, и т.п.);
- производство черных металлов (чугун, сталь, доменные ферросплавы, металлические порошки черных металлов);
- изготовление стальных и чугунных труб;
- коксохимическая промышленность (изготовление кокса, коксового газа и пр.).

Особое внимание хотелось бы уделить изготовлению труб, а именно трубной промышленности Российской Федерации. Трубная промышленность является основным сегментом металлургического комплекса России и может рассматриваться как один из важнейших показателей оценки качества российского металлопроката. Металлургическая отрасль, а в ее составе и трубная промышленность занимают лидирующие позиции в экономике страны, а налоговые отчисления крупных трубных компаний наряду с добывающей отраслью, являются основной статьей дохода бюджета РФ.

Оценивая роль трубной промышленности для российской экономики, необходимо отметить ее взаимосвязь с ведущими и важнейшими отраслями народного хозяйства России, такими как: топливно-энергетический комплекс, машиностроение, строительная индустрия, оборонную отрасль и нефтегазовый комплекс. Это имеет особое значение для России, так как нефтедобывающая и трубная промышленности являются стратегически важными отраслями страны для обеспечения энергоресурсами.[3]

Сейчас доля российских труб на мировом рынке составляет всего 10%. В настоящий момент на территории Российской Федерации насчитывается порядка 80 металлургических предприятий, которые занимаются производством труб. Уже в начале 2001 г. был образован альянс, в который вошли «Северсталь», «Выксунский металлургический завод», Челябинский трубопрокатный завод. Также в апреле 2001 г. была образована Объединенная металлургическая компания (ОМК), в состав которой вошли несколько металлургических заводов: Выксунский, Чусовский, Щелковский, Челябинский трубопрокатный, «Губахинский коксохим». В этот же период сформировалась и Трубно-металлургическая компания (ТМК), в состав которой вошел Волжский трубный завод. Основными целями таких объединений можно считать установление кооперации между металлургами и трубниками, которая основывалась на многолетнем опыте взаимодействия и стабильных производственных связях.

На данный момент трубный рынок РФ контролируется тремя основными холдингами. Главный холдинг – ТМК (в наличии 4 крупных заводов на территории России). Потом расположился холдинг ОМК (два завода в России), и ЧТПЗ (Челябинский трубопрокатный завод и Первоуральский новотрубный завод).[4]

Эти гиганты-холдинги также называют «Большая трубная тройка». Процент отгрузок готовой продукции достигает рекордной отметки 80 %. Остальные 20 % составляют мелкие производители на территории России.

На долю российских предприятий ТМК в 2017 г. приходится основная масса – около 3 млн. 283 тыс. тонн продукции, что составило 28,3 % производства отрасли.[5] Выксунский металлургический завод занимает около 18,2 % производства отрасли; Челябинский трубопрокатный – 10,9 %; Первоуральский новотрубный - 7,7 %[6]; а Ижорский трубный – 4,9 %. На долю остальных предприятий приходится порядка 30 % суммарного объема производства трубной продукции.

Наращивание производственных темпов происходит каждый день. Все представители «большой трубной тройки» не отстают друг от друга. Также стоит отметить и наращивание темпов малыми предприятиями в России.

Широкий ассортимент продукции, выпускаемой компаниями, востребован в энергетическом секторе и является приоритетным направлением, но они так же пользуются спросом в нефтегазовой и химической промышленности, машиностроении, строительстве, сельском хозяйстве и других отраслях. Компании выпускают трубы для теплообменников, к техническим параметрам которых предъявляются высокие требования, и поставляют свою продукцию на российский и зарубежный рынок. На сегодняшний день металлургические предприятия делают упор на стратегию экономичного производства и выпуска конкурентоспособной продукции с максимально возможными качественными характеристиками для удовлетворения потребностей как внутренних, так и внешних заказчиков.

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что внедрение инновационных проектов в данную отрасль необходимо.

1.2. Современные представления о суперсплавах на основе никеля

В работе представлены исследования суперсплава на основе никеля, хрома и вольфрама, и нанесения на него защитного металлического покрытия, с целью защиты и повышения прочностных характеристик, для дальнейшего использования данного материала в промышленности.

Суперсплавы (superalloys) — это жаропрочные сплавы на основе Ni, Co и Fe, предназначенные для работы в экстремальных температурно-силовых режимах при одновременном воздействии агрессивной среды[7]. Современные суперсплавы представляют сложнолегированные прецизионные сплавы, при выплавке и обработке которых используются наиболее прогрессивные методы. Значительная часть суперсплавов используется в качестве конструкционных материалов для наиболее жестких условий эксплуатации.

Суперсплавы Ni-Cr-W являются относительно новой системой, которая исследуется в поисках превосходной высокотемпературной механической прочности и долгосрочной прочности и ползучести, при использовании в температурном режиме приблизительно в 1000°C [8]. И хром, и вольфрам в качестве усиливающего элемента твердого раствора, сокращают энергию дефекта кристаллической решетки и снижают коэффициент диффузии, что повышает жаропрочность сплава. Кроме того, небольшое количество углерода, добавляемого в сплав, используется для формирования карбидов, которые предотвращают чрезмерное укрупнение зерна и усиливают его границы.

1929 г. — год зарождения истории суперсплавов, когда впервые разработанный ранее жаростойкий хромоникелевый сплав с гранцентрированной кубической решеткой дополнительно легировали небольшими добавками Ti и Al. Это обеспечило значимый прирост

сопротивлению ползучести. В целом, постоянная разработка новых сплавов с особыми свойствами тесно связана с появлением в XX веке новых конструкций.

Суперсплавы на никелевой основе в качестве особо жаропрочных материалов имеют наибольшее распространение[9]. Температура таких сплавов к температуре их плавления значительно выше, чем у других систем легирования. Суперсплавы имеют сложный химический состав, насчитывающий до 10 – 12 компонентов [9].

Интерметаллидная γ -фаза, которая выделяется при старении из твердого раствора, имеет уникальные свойства и главным образом отвечает за упрочнение. Фаза имеет ГЦК структуру, как и твердый раствор, и выделяется согласовано. С повышением температуры прочность γ -фазы увеличивается, а ее пластичность позволяет не стать ей источником для разрушения. Сопротивление ползучести никелевых сплавов зависит от морфологии выделившихся интерметаллидов и их объемной доли (рисунок 1).

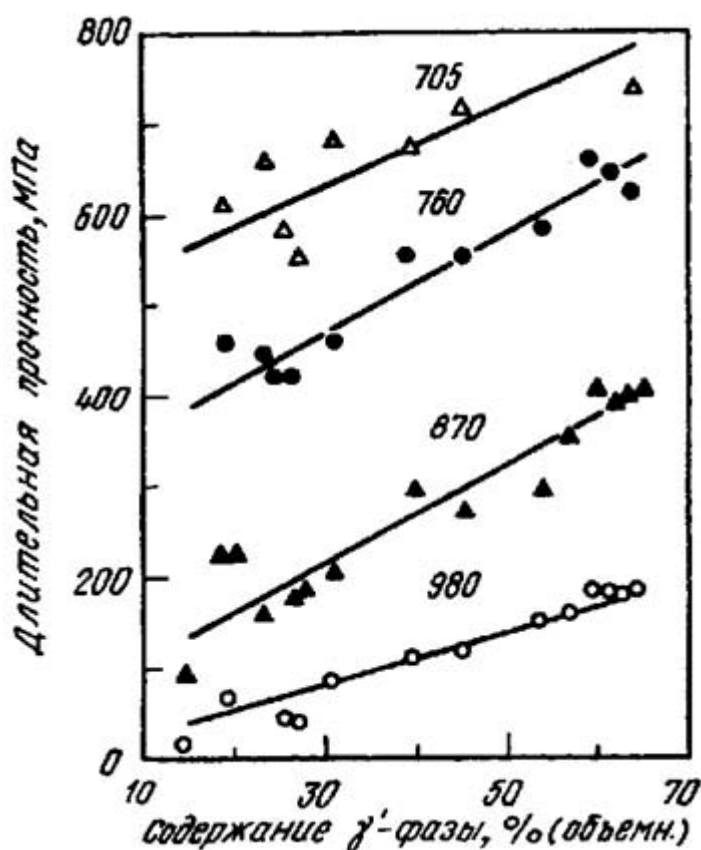


Рис. 1. — Влияние объемной доли γ' -фазы на длительную прочность на базе 100 ч для жаропрочных никелевых сплавов. Числа у кривых — температура испытания, °C.

Никелевые сплавы, у которых объемная доля γ' -фазы выше 50 %, не подвергаются обычным способам горячей деформации. Для получения изделий из них используют метод точного литья.

Определяющей для длительной прочности никелевых сплавов является стабильность структуры. Процессами старения обуславливается большая часть структурных изменений, которые сводятся к выделению карбидов, модификации γ' -фазы или образованию других интерметаллидных фаз, а также к образованию обогащенной хромом хрупкой σ -фазы. Выделения фаз происходят сравнительно за короткий срок при высоких рабочих температурах, так как имеют повышенную диффузионную способность. Формирование выделений происходит на границах зерен и покрытие границы сходно пленке, вследствие чего понижается сопротивление ползучести.[9]

Повысить стабильность границ за счет затормаживания диффузии на границах зерен помогут добавки небольшого количества бора и циркония, как это происходит в аустенитных сталях.

Жаропрочные суперсплавы должны содержать минимальные концентрации таких вредных примесей, как S, P, Pb, Bi, Te.[9]

Один из перспективного пути развития заключается в разработках суперсплавов с увеличением надежности и экономическим эффектом, который достигается за счет уменьшения в составе доли дорогих легирующих компонентов. Также увеличенное сопротивление ползучести и термомеханической усталости, максимальная структурная стабильность, повышенная стойкость к окислению – характеристики суперсплавов, которые представляют интерес для будущих многообещающих исследований.

1.3. Сведения об исследуемом материале

1.3.1. Основные жаропрочные сплавы на никелевой основе

Жаропрочные и жаростойкие никелевые сплавы как материал имеют обширное применение во всех сферах промышленности, в том числе и в высокоточной области – изготовление деталей для теплообменников в энергетическом секторе. Широкое применение также найдено для изготовления газотурбинных двигателей.

Жаропрочные сплавы на никелевой основе подразделяются на 2 группы:

1. Сплавы, имеющие в составе титан и алюминий и упрочняющиеся за счет образования интерметаллидной фазы γ' [N_3 (Ti, Al)] (ЭИ437, ЭИ617, ЭИ698, ЭИ826, ЭИ929, ЖС6К, ЖСЗ, ЖС6, ЭП57, ЭП539, ЭП220)

2. Сплавы, в составе которых имеется только алюминий, упрочняющиеся фазой T_3 Al (ЭИ827, ЭИ828, ЭИ867, ЭП109, ЭП238).

Исследуемый сплав ХН60ВТ относится ко второй группе и имеет обозначение ЭИ 868. За рубежом не было практики применения такого типа сплава в деформированном состоянии. Отечественные сплавы легировались и молибденом, и вольфрамом, тогда как за границей вводили только молибден.

Исследования доказали, что использование одновременно Мо и W уменьшает разупрочнение сплавов, в отличие от добавки одного Мо. Сплавы на железной или кобальтовой основе уступают в жаропрочных свойствах перед сплавами никелевой группы, у которых высокие показатели достигаются за счет сложного легирования.

Металлический никель при 800°C имеет 100-ч длительную прочность 40 МПа. Хром улучшает окалиностойкость и повышает энергию связи атомов в твердом растворе системы Ni—Cr—Fe. Но присадка 20 % хрома к никелю недостаточно упрочняет твердый раствор при высоких температурах, из-за чего увеличение предела длительной прочности составляет 25-30%.

Титан при введении в сплавы в количестве 2,5-3,0 % способствует образованию высокодисперсных интерметаллидных фаз при умеренных температурах. Тем самым возрастает 100-ч длительная прочность при 800°C до 150 МПа и повышается сопротивление сплава пластической деформации. Внедрение титана вместе с бором повышает 100-ч длительную прочность при 800° до 200 МПа. Также рост жаропрочности обеспечивает повышение в составе сплава доли алюминия или титана (или их сумма) одновременно с бором и тугоплавкими элементами, такими как вольфрам, молибден или ниобий. Установлено, что повышаются характеристическая температура, пределы длительной прочности и внутреннее трение вместе с внедрением титана в никель и в хромоникелевые сплавы. Известно, что между скоростью роста частиц второй фазы при старении сплава на никелевой основе и длительной прочностью имеется определенное соответствие. Присадка бора ускоряет процессы укрупнения частиц.[10]

Никелевый сплав марки ЭИ 868. обладает высокой стабильностью свойств, определяемых при длительных испытаниях на разрыв, что подтверждено неоднократными испытаниями в лабораторных и промышленных условиях. Между длительной прочностью, твердостью при соответствующей температуре испытания и количеством упрочняющих фаз, образующихся в результате термической обработки хромоникелевых сплавов, наблюдается определенная зависимость. С повышением содержания титана или алюминия или их суммы в никельхромистом сплаве увеличивается количество интерметаллидной фазы типа γ' [Ni (Ti,Al)] или фазы Ni_3Al .

С понижением температуры растворимость титана в двойной и в тройной системах резко падает. Так, при 750°C в двойной системе Ni-Ti растворимость титана составляет уже 10%, а в тройных сплавах с 20% Cr — примерно 4%. По-видимому, при дальнейшем снижении температуры растворимость титана Ni-Cr твердом растворе еще более резко падает и сплавы с содержанием титана меньше 4% при комнатной температуре, возможно, уже являются двухфазными. Однако в состав жаропрочных сплавов, кроме титана, как правило, входит алюминий. Согласно диаграммам состояния системы Ni—Al—Ti, алюминий оказывает значительное влияние на растворимость титана в никеле. Так, при 1150°C растворимость титана в никеле снижается с 13 до 8% при содержании 5% Al. При 750°C это явление еще более ярко выражено. Аналогичное действие на растворимость алюминия в никеле оказывает титан.

Насыщенный γ -раствор титана в никеле находится в равновесии с интерметаллидным соединением Ni_3Ti (τ)-фаза с гексагональной решеткой в двойной системе без алюминия и в тройной системе при малых концентрациях алюминия. [11] Насыщенный (γ) твердый раствор алюминия в никеле находится в равновесии с γ -фазой с гранецентрированной кубической решеткой, построенной на базе соединения Ni_3Al . В тройной системе в области более высокого содержания алюминия, γ' -фаза представляет

основную вторую фазу. Растворимость обоих соединений $[\text{Ni}_3 \text{Ti} (\tau)\text{-фаза})$ и γ' -фазы в твердом растворе в зависимости от температуры из меняется, что сообщает сплавам способность к дисперсионному упрочнению. [11]

При введении хрома в двойные и тройные сплавы системы Ni-Al-Ti механизм превращений в этих сплавах не меняется, но кривые растворимости смещаются в сторону меньших концентраций. Кроме того, изменяется энергия связи атомов в кристаллической решетке и скорости диффузии хрома и титана.

Наиболее распространенной фазой, играющей главную роль в упрочнении жаропрочных сплавов на никелевой основе и ряда сплавов на никелевой основе, является γ' -фаза. Она имеет гранецентрированную кубическую решетку, близкую к решетке γ -твердого раствора, но несколько большего параметра, и по химическому составу приближается к соединению Ni (Ti,Al); γ' -фаза содержит небольшие количества хрома. [11]

Известно, что закаленный пересыщенный твердый γ -раствор по существу не является однородным в отношении распределения атомов алюминия и титана в решетке растворителя. В зависимости от скоростей охлаждения и состава величина этой неоднородности различна. Имеются области, настолько обогащенные титаном и алюминием, что в них возможно образование сверхструктуры с размерами от 80 до 1000 Å.

Установлено, что предварительное разупрочняющее высокотемпературное старение приводит к значительному развитию сдвиговой деформации. Несмотря на межзеренный характер разрушения, этот сплав сохраняют высокую пластичность. С увеличением содержания титана или алюминия или их I суммы увеличивается количество γ' -фазы или фазы $\text{Ni}_3 \text{Al}$ и их термическая стойкость. При этом алюминий оказывает очень сильное влияние на количество γ' -фазы в никельхромтитанистых сплавах. С повышением количества алюминия содержание легирующих элементов в γ' -фазе резко возрастает. Сплавы на никелевой основе (без титана) упрочняются вследствие образования фазы $\text{Ni}_3 \text{Al}$, которая также

повышает их жаропрочные свойства. Таким образом, алюминий представляет ценный легирующий элемент в аустенитных сталях с высоким содержанием никеля, особенно в сплавах на никелевой основе. Одновременное введение титана и алюминия действует более эффективно, чем добавка только титана. Алюминий, вводимый в сложнолегированные никельхромистые жаропрочные сплавы, оказывает очень сильное влияние на повышение жаропрочных свойств этих сплавов, причем тем большее, чем выше его содержание. Однако если количество алюминия больше 3- 4%, то возникают затруднения при ковке, что и ограничивает возможность более сильного легирования этим элементом труднодеформируемых жаропрочных сплавов [11].

1.3.2. Строение, фазовый состав и теплофизические свойства сплава

ХН60ВТ

Жаропрочный и жаростойкий сплав на никелевой основе ЭИ868 относится к группе хромоникелевых сплавов и достаточно широко применяется в промышленности, т.к. может работать при достаточно высоких температурах и повышенных нагрузках. Сплав ХН60ВТ согласно ГОСТ 5632-72 [12] имеет химический состав: 23,5-26,5 % Cr, 13-16 % W, 0,3-0,7 % Ti, ≤ 4 % Fe, $\leq 0,5$ % Mn, $\leq 0,8$ % Si, $\leq 0,5$ % Al, $\leq 0,1$ % C, остальное Ni (табл.1), механические свойства сплава представлены в таблице 2.

Таблица 1. Химический состав хромоникелевого сплава ЭИ868, % по массе.

C	Cr	W	Ti	Ni	Al	Fe	Mn	Si	Cu	S	P
Не более											

0,10	23,5- 26,5	13- 16	0,3- 0,7	Основа	0,5	4,0	0,50	0,80	0,07	0,013	0,013
------	---------------	-----------	-------------	--------	-----	-----	------	------	------	-------	-------

Некоторые механические и физические свойства хромоникелевого сплава представлены в табл. 3-8. Сплав ЭИ868 удовлетворительно деформируется в горячем и в холодном состоянии. Температурный интервал горячей деформации составляет 1180-1050⁰ С. Охлаждение после деформации производится на воздухе. Сплав можно деформировать глубокой вытяжкой. Придельный коэффициент вытяжки составляет 2,06. Сплав удовлетворительно обрабатывается резанием. Сплав ЭИ868 (ХН60ВТ) применяется в деталях камер сгорания, форсажных камерах авиационных двигателей, в качестве элементов жаровых труб, экранов и других деталей, работающих длительное время при температурах 900-1000⁰ С.

Таблица 2. Механические свойства хромоникелевого сплава ЭИ868.

Тип полу- фабриката	ГОСТ , ОСТ, ТУ	Состоян ие полуфаб риката	Темпе ратура испыт ания, ⁰ С	Предел прочнос ти $\sigma_{>v}$, МПа	Относит ельное удлинен ие δ , %	Относит ельное сужение ψ , %
Прутки диаметром от 8 до 60 мм	ЦНИИ ЧМ 293-60	Закаленн ые с температ уры 1160 ⁰ С на воздухе в течении 30-60 мин.	20	750-850	25-30	-
90	190-	-	25-30			

	197					
Прутки диаметром от 20 до 120 мм или со стороной квадрата 55-120 мм.	ТУ 14- 1-286- 72	Закаленн ые с температ уры 1150 -1200 °С на воздухе в течении 30-60 мин.	20	770-890	-	-
90	220	45	50			
Прутки, трубные заготовки диаметром от 60 до 165 мм	ЦНИИ ЧМ 304-60	Закаленн ые с температ уры 1200 °С на воздухе в течении 60-120 мин.	20	790-850	-	-
90	190- 197	30-35	35-45			
Лист холоднокат	ТУ 14- 1- 1747-	Закаленн ые с 1150-	20	≤1050	40	-

анный	76	1200 ⁰ С в воде, под водяным душем или на воздухе.				
90	180	30	-			

Таблица 3. Пределы длительной прочности, ползучести и выносливости хромоникелевого сплава ЭИ868[9].

Состояние материала	Температура испытания, ⁰ С	$\sigma_{>100>}$, МПа	$\sigma_{>200>}$, МПа	$\sigma_{>300>}$, МПа	$\sigma_{>0,2>}$, МПа	$\sigma_{>-1>}$, МПа
Закаленный с температуры 1200 ⁰ С охлаждением на воздухе	20	-	-	-	-	250-300
800	190-200	80-95	70-80	25-34	150-163	
900	40-60	38-45	35-40	10-14	120-125	

Плотность сплава ЭИ868 составляет 8,88 г/см³.

Таблица 4. Жаростойкость (окалиностойкость) при 100-часовом испытании в воздушной среде[9].

Температура испытания, ⁰ С	Вид покрытия	Привес, г×мм ² /час.

1100	без покрытия	0,365
1100	с покрытием эмалью ЭВ-55	0,145
1200	без покрытия	0,607

Таблица 5. Коэффициент термического расширения хромоникелевого сплава
ЭИ868

Температура испытания, °С	20- 100	20- 200	20- 300	20- 400	20- 500	20- 600	20- 700	20- 800	20- 900
$\alpha \times 10^{-6} 1/\text{град.}$	12,7	13,2	13,7	14,1	14,5	15,1	15,6	16,0	16,2
Температура испытания, °С	100- 200	200- 300	300- 400	400- 500	500- 600	600- 700	700- 800	800- 900	900- 1000
$\alpha \times 10^{-6} 1/\text{град.}$	13,7	14,5	15,4	16,2	18,0	18,8	18,9	19,7	20,4

Таблица 6. Удельная теплоемкость хромоникелевого сплава ЭИ868[9].

Температура испытания, °С	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$C, \text{ кал. / грамм}$ $\times ^\circ\text{C}$	0,105	0,11	0,115	0,12	0,125	0,13	0,13	0,135	0,14

Таблица 7. Теплопроводность хромоникелевого сплава ЭИ868.

Температур а испытания , °С	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$\lambda, \text{ кал. /}$ $\text{см} \times \text{сек} \times ^\circ\text{C}$	0,023	0,025	0,02 8	0,03 3	0,03 9	0,04 9	0,05 1	0,05 6	0,06 2

Сплав немагнитен. Хорошо сваривается аргонно-дуговой и контактной сваркой.

В табл. 8 представлена штампуемость сплава ЭИ868 (ХН90ВТ) при холодной листовой штамповке.

Таблица 8. Штампуемость хромоникелевого сплава ЭИ868 [5].

Вид листоштамповочн ой операции	Вытяжка	Отбортовк а	Сферическо е выдавливан ие	Гибка
Показатель штампуемости	Коэффицие нт вытяжки $K_{\text{выт.}}$	Коэффицие нт отбортовки $K_{\text{отб.}}$	Коэффициен т выдавки $K_{\text{выд.}}$	Минимальн ый радиус гибки r_{min}
Численное значение показателя	1,8-1,9	1,5-1,55	0,35-0,4	1 - 1,2 от толщины листа

1.4. Сведения о защитном покрытии – металлический порошок ПВ-НХ16Ю6Ит

Ввиду необходимости защиты металлов от агрессивной среды, в которой они чаще всего используются, особое значение имеет выбор материала для покрытия. Для этого нужно определить ряд критериев: совместимость физических и механических свойств материалов покрытия и подложки, их упругость, твердость, коэффициент термического расширения; **степень прочности сцепления** между покрытием и подложкой, отсутствие электрохимического взаимодействия; возможность нанесения покрытия на подложку выбранным способом, который обеспечит равномерность толщины, необходимой структуры и определенного комплекса свойств.

Важное значение имеет определение условий эксплуатации детали. Только определив температуру, среду и условия контакта, уровень и

характер действующих нагрузок, можно сделать предварительные выводы о том, какими характеристиками должен обладать материал для создания покрытия.

Необходимо учитывать, что между наносимым материалом и подложкой находится условная граница, на которой, вследствие различия в модулях упругости двух материалов, а также при действии внешних нагрузок, возникают касательные сдвигающие напряжения. Величина этих напряжений возрастает с увеличением толщины покрытия. Она тем выше, чем больше разница в характеристике упругости взаимодействующих материалов.

Термическое воздействие на детали с покрытием ведет к возникновению касательных напряжений, что является следствием различия в коэффициентах термического расширения. Также, величина этих напряжений зависит от того, насколько изменяется температура и какие различия имеются в коэффициентах термического расширения материалов покрытия и подложки.

Отслоение покрытия от подложки в процессе эксплуатации изделий, является следствием касательных напряжений.

С развитием машиностроения, станкостроения и авиастроения, и ремонта интенсивно ведутся исследования по получению композиционных (многокомпонентных) покрытий, содержащих частицы высокой твердости, такие как карбиды, нитриды, бориды и/или частицы антифрикционного материала- медь, бронза, серебро, молибден, нитрид бора и др.

Для повышения износостойкости и обеспечения характеристик фрикционных свойств используют обычно покрытия из металлов, наносимые различными способами.

Наиболее широкое применение получают многослойные покрытия за счет выполнения ими сразу нескольких функций. Нанесение покрытий в несколько слоев позволяет увеличить прочность покрытия и обеспечить

высокую стойкость инструмента или детали к абразивному, диффузионному и окислительному износу, снизить трение и термобарьерный эффект.

В исследовании принимал участие порошок металлида ПВ-НХ16Ю6Ит (размер частиц 40-100 мкм). Он имеет такие преимущества как: скоростью протекания порошка в сухом виде через отверстие заданного диаметра; способностью к пластичной деформации; способностью сохранять форму; способностью под воздействием нагрева образовывать прочное тело или величиной усадки.[10]

Он используется: для напыления всех видов; для наплавки; для создания однородных металлических конструкций; в электротехнике, приборостроении; в металлургии, машиностроении; в нанотехнологиях; в авиации; в химической промышленности; в атомной энергетике; в космической промышленности; в качестве защиты изделия от коррозии и износа.

Методом газоплазменного напыления металлического порошка ПВ-НХ16Ю6Ит в защитной среде из смеси азота с аргоном с помощью плазмотрона ПП-25 на трубы из сплава ХН60ВТ наносилось защитное покрытие.[13] Порошок ПВ-НХ16Ю6Ит содержит 16%Cr, 6%Al, остальное – никель. К сожалению, часто покрытия Ni-Cr-Al характеризуются неоднородной (слоистой) структурой, заметной (до 20%) пористостью, в том числе открытой, а также недостаточно высокой адгезией к сплавам Ni-25%Cr-15%W (не более 300...330 кГ/см²).[13]

Исходя из вышеуказанного, актуальным для дальнейшего проектирования является способ получения покрытий из сплавов Ni-Cr-Al однородной микроструктуры, с небольшой пористостью и **повышенной адгезией** к изделиям из суперсплавов Ni-25%Cr-15%W.[13]

1.5. Теоретические основы экспериментального метода, использованного в работе – определения модуля Юнга E и твердости H методом наноиндентирования

Возможность проведения механических испытаний в микрообъемах и экспериментального определения модуля Юнга E и твердости H основного металла, покрытия и металла до нанесения покрытия предоставляет метод наноиндентирования [14]. Метод наноиндентирования основан на измерении и анализе зависимости нагрузки при вдавливании индентора P в поверхность материала от глубины внедрения индентора h . Данный метод является неразрушающим и позволяет проводить корректные измерения модуля Юнга в диапазоне абсолютных значений от 50 до 1000 ГПа. При этом минимальный размер участка для измерений составляет порядка 200 нм.

Рис. 2. Схема продольного сечения зоны индентирования, где 1 – наконечник; 2 – поверхность отпечатка в испытательном образце после полной разгрузки; 3 — поверхность соприкосновения испытуемого образца с наконечником при максимальной глубине индентирования и испытательной нагрузке.[15]

Непрерывное измерение значений нагрузки и глубины индентирования позволяет определить твердость и свойства материала (см. рис. 2). Необходимо использовать наконечник из материала, более твердого, чем испытуемый материал, имеющий следующие формы:

- а) алмазный наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом $\alpha = 136^\circ$ между противоположными гранями при вершине (алмазный наконечник Виккерса);
- б) алмазная пирамида с треугольным основанием (например, пирамида Берковича);
- с) шарик из твердого сплава (особенно для исследования материалов в упругой области);
- д) алмазный сферический наконечник.

Настоящий стандарт [15] не исключает использования наконечников другой формы, однако эту форму необходимо учитывать при интерпретации результатов, полученных с помощью таких наконечников.

Можно также использовать другие материалы наконечника, например, сапфир.

Методика измерений может быть реализована двумя способами:

- задавая нагрузку, измеряют вызываемое ею перемещение наконечника;
- задавая перемещение наконечника, измеряют вызывающую это перемещение нагрузку.

Значения испытательной нагрузки F и соответствующей глубины индентирования h фиксируют в течение всего измерения. В результате получают данные по прикладываемой нагрузке и соответствующей глубине индентирования как функции времени, F - h -диаграмму.

Для достоверного определения нагрузки и соответствующей ей глубины индентирования, для каждого цикла испытаний важно установить нулевую точку индентирования для кривой F - h .

При измерении зависимых от времени эффектов:

а) с помощью метода контроля испытательной нагрузки прикладываемую нагрузку поддерживают постоянной в течение определенного периода времени, а изменение глубины индентирования измеряют как функцию времени выдержки под нагрузкой;

б) с помощью метода контролируемой глубины глубину индентирования поддерживают постоянной в течение определенного периода времени, а изменение прикладываемой нагрузки измеряют как функцию времени удержания фиксированной глубины индентирования.[15]

Измерение наномеханических свойств – модуля Юнга E (ГПа) и твердости HV (ГПа) – проводили методом наноиндентирования с помощью НаноСкан-4D (ФБГНУ ТИСНУМ, Россия) в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.748-2011 (ISO 14577). При проведении эксперимента применяли

зондовый датчик, в качестве рабочей части которого используется алмазная призма Берковича. Для управления работой НаноСкан-4D использовали ПО NanoScan Device, для получения, хранения и статистической обработки результатов измерений – ПО NanoScan Viewer. Измерение осуществляли в условиях непрерывного нагружения линейно нарастающей во времени нагрузкой до 50 мН при комнатной температуре. Нагружение и разгрузка индентора, а также запись диаграммы $P-h$ (прикладываемая нагрузка – глубина внедрения индентора) осуществлялись автоматически. Нанотвёрдость и модуль Юнга определяли в результате 50 измерений для каждой из областей: основного металла и покрытия. Размер отпечатка индентора измеряли при максимальной глубине погружения индентора. Для обработки результатов механических испытаний материала в субмикрообъемах использовали метод Оливера и Фара [16]. Значения твёрдости рассчитывалось как отношение максимальной нагрузки к площади проекции невосстановленного отпечатка. Определенная таким способом величина твёрдости HV равна среднему давлению на контактную поверхность «индентор–образец».

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Результаты металлографического исследования микроструктуры суперсплава Ni-25%Cr-15%W с напылением порошка Ni-Cr-Al

В данной работе средствами растровой электронной микроскопии, в том числе EDS-анализа, проведено металлографическое исследование микроструктуры биметаллических образцов: подложка сплав Ni-25%Cr-15%W марки ХН60ВТ + покрытие из порошкового сплава Ni-Cr-Al марки ПВ-НХ16Ю6Ит.

Металлографическое исследование методом рентгеноспектрального микроанализа (EDS) обнаружило наличие зерненной структуры с ярко выраженными сегрегациями углерода, кислорода, алюминия, хрома, кремния и железа на границе напыленного слоя и основного металла (рис. 3). Микроструктура покрытий, полученных при газопламенном напылении, является сложной и многофазной с дефектами и полостями. Структурная неоднородность вызвана различными условиями охлаждения и теплопередачи слоев в процессе напыления. Установлено, что границы зерен окаймлены включениями оксидной фазы [17]. Данный факт указывает на протекание окислительных процессов, сопутствующих формированию интерметаллидного покрытия с образованием оксидов алюминия и хрома. Для сплава Ni-Cr-Al практикуется двух стадийная окислительная обработка на воздухе: при 800–900°C для образования внешней окалины Al_2O_3 и при температуре 1100–1200°C для образования частиц Al_2O_3 внутри металла [18-20]. Сегрегации атомов Fe и Si на границе покрытия и основного металла возможно связаны с тем, что окисел SiO_2 лучше, чем Al_2O_3 , смачивается сплавами железа, что связано со структурой промежуточного слоя в системе Si-SiO₂-Al [21]. Сегрегации атомов Fe, Si и C на границе покрытия и основного металла могут свидетельствовать об образовании кристаллов силицида железа

Fe_2Si , карбидов FeC и SiC . Средствами РЭМ (EDS-анализ) удалось обнаружить включения Al_2O_3 на границе покрытия и основного металла.

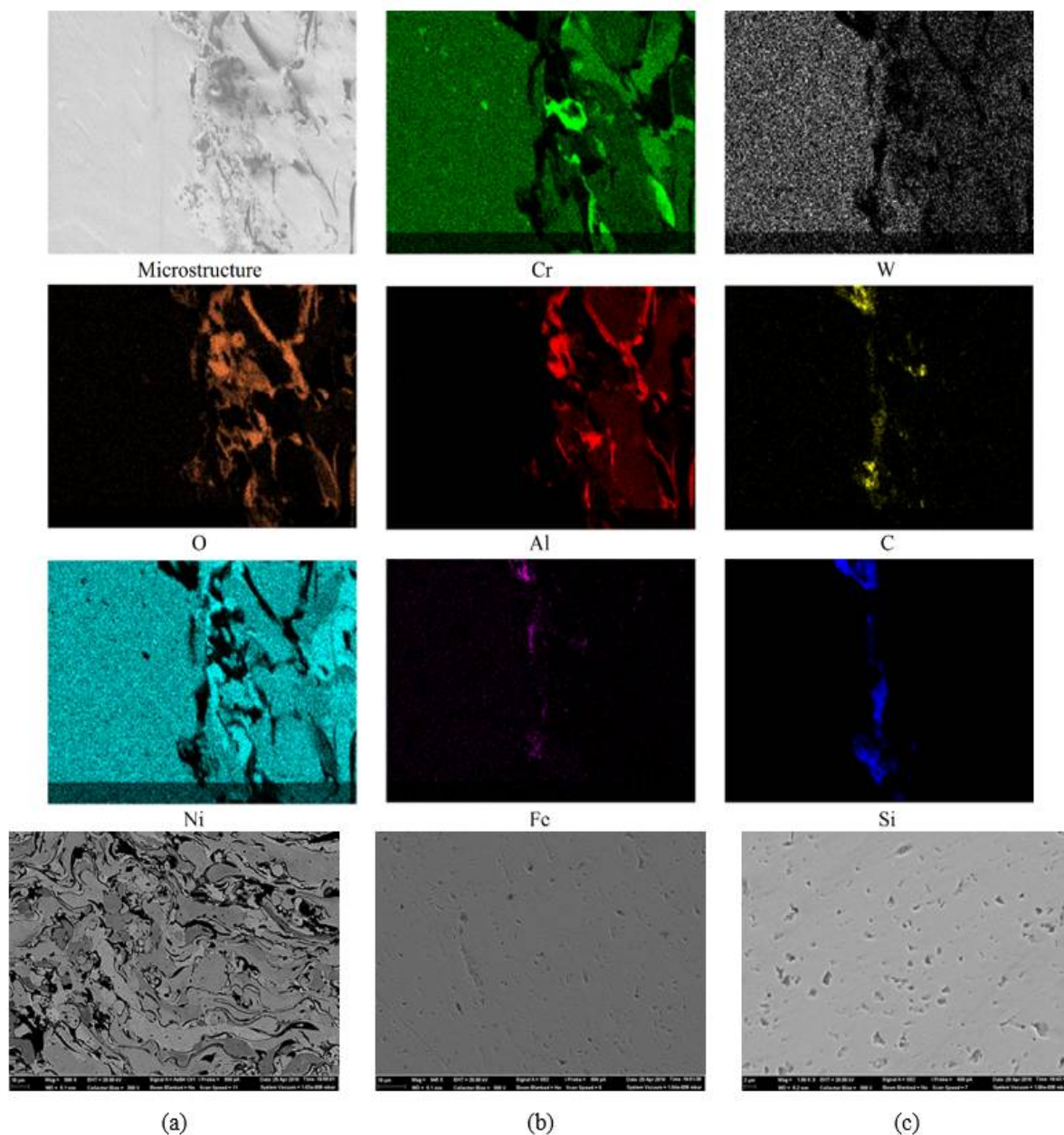


Рис. 3. Микроструктура поперечного сечения поверхности трубы сплава ХН60ВТ с покрытием порошка ПВ-НХ16Ю6Ит и EDS-анализ в виде карт распределения элементов. РЭМ-изображения в обратно рассеянных электронах: (а) покрытие; (б) основной металл; (с) металл перед нанесением покрытия.

2.2. Результаты измерения механических свойств – твердости и модуля Юнга

Результаты измерения механических свойств – твердости HV (ГПа) и модуля Юнга E (ГПа) представлены на рис. 4 и в табл. 8. Для основного

металла наблюдается по одному ярко выраженному пику на гистограммах, соответствующему средним значениям твердости HV и модуля Юнга E (рис. 4). Такой вид гистограмм E и HV свидетельствует об однородности механических свойств материала в субмикрообъемах за счет перераспределения дефектов кристаллической решетки (дислокаций) внутри кристаллитов. Отсутствие существенного различия случайного разброса значений твердости HV и модуля Юнга (при доверительной вероятности 95%) для основного металла также позволяет заключить о высокой степени однородности механических свойств [22-23]. Покрытие характеризуется сложной структурой (рис. 3), что ведет к неоднородности механических свойств материала в субмикрообъемах: наблюдаются не расплавленные и не деформированные частицы; не расплавленные, но пластически деформированные частицы и расплавленные частицы. Количество частиц первого типа в покрытиях не велико. В результате измерений микротвердости было выявлено, что максимальной твердостью обладают частицы третьего типа, что связано со структурными изменениями, происходящими в частицах этого типа при кристаллизации. Во-первых, нагрев частиц в плазменной струе приводит к образованию гомогенного расплава, а быстрая кристаллизация (время затвердевания частиц – $10^{-5} \dots 10^{-7}$ с [24]) к фиксации метастабильных структур (пересыщенных твердых растворов), что характерно при напылении сплавов, количество легирующих элементов в которых превышает предел их растворимости в твердом состоянии. Согласно [22] величина дополнительного давления P_r , которое возникает на границе покрытия и подложки из-за разницы в модулях упругости E незначительно и не может служить причиной разрушения детали. С использованием полученных значений твердости HV и модуля Юнга E может быть рассчитана адгезия покрытия и подложки, значения энергии и силы адгезии, а также прочности сцепления [25-28].

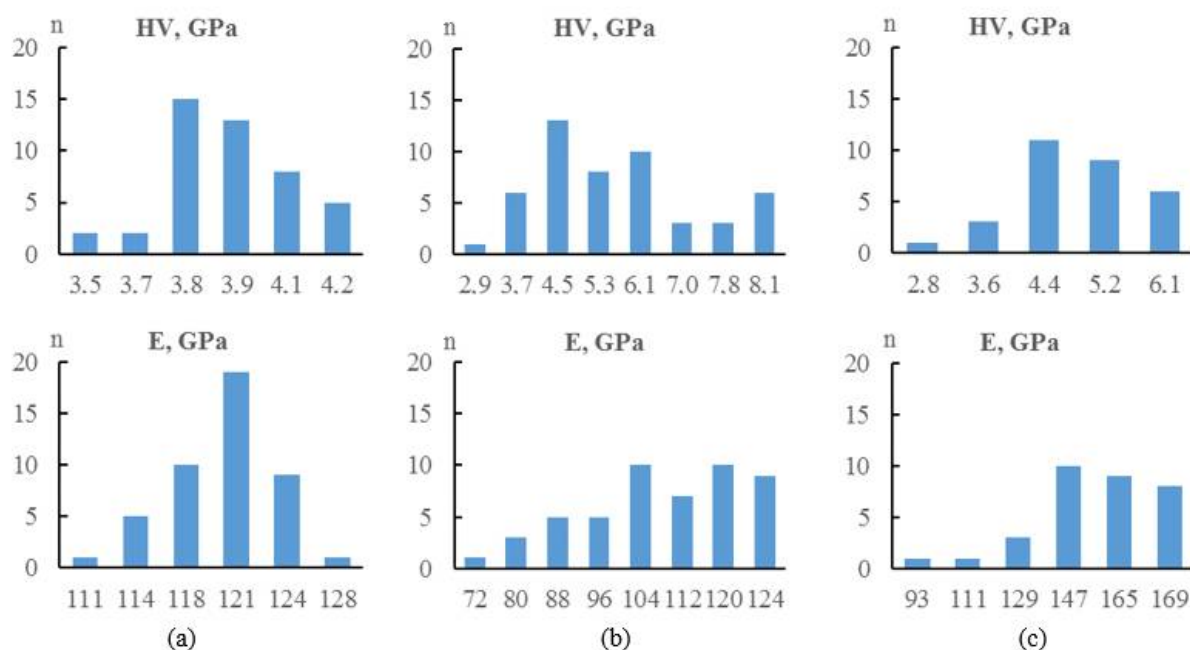


Рис. 4. Гистограммы распределения модуля Юнга E (ГПа) и твёрдости HV (МПа): (а) основного металл; (б) покрытие; (с) металл перед покрытием.

Таблица 8. Твёрдость HV(МПа) и модуль Юнга E (ГПа)

Материал	Твёрдость HV, ГПа	Модуль Юнга E, ГПа
Основной металл	$3,88 \pm 0,17$	$118,74 \pm 4,23$
Покрытие	$5,29 \pm 1,58$	$104,46 \pm 15,36$
Металл до нанесения покрытия	$4,64 \pm 1,05$	$147,42 \pm 20,76$

2.3. Расчет адгезии покрытия и подложки

Адгезия покрытия и подложки (K_{int}) может быть рассчитана с использованием следующих уравнений [25]:

$$K_{\text{int}} = 0.015 \frac{P_c}{a_c^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{E}{H} \right)_{\text{int}}^{\frac{1}{2}} \quad (1),$$

$$\left(\frac{E}{H} \right)_{\text{int}}^{\frac{1}{2}} = \frac{\left(\frac{E}{H} \right)_S^{\frac{1}{2}}}{1 + \left(\frac{H_S}{H_R} \right)^{\frac{1}{2}}} + \frac{\left(\frac{E}{H} \right)_R^{\frac{1}{2}}}{1 + \left(\frac{H_R}{H_S} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2),$$

где H и E – твердость и модуль Юнга, индексы S и R для подложки и покрытия соответственно. Значения нагрузки P_c и длины трещины a_c определяются по излому на кривых $\ln a$ ($\ln P$) при индентировании. Кроме того, энергия разрушения, G_c , может быть получена из соотношения:

$$G_c = K_{\text{int}}^2 (1 - \nu) / E \quad (3),$$

где E и ν модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала покрытия, соответственно. Авторы рассчитали величину адгезии покрытия и подложки $K_{\text{int}} = 3,7 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$ и энергию разрушения покрытия $G_c = 88 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$, что согласуется с данными работы [25].

3. ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1. Расчет затрат на проведение научно – исследовательской работы

3.1.1. Целесообразность расчетов затрат на проведение научно-исследовательской работы

Имея результаты проведенных экспериментов были получены соответствующие новые научные знания, опыт и определенные выводы. Тем самым, исследуя образцы, была выявлена инновационная методика оценки адгезии нанесенного покрытия. Целесообразным является проведение расчета затрат на данные эксперименты, как одного из составляющей процесса оценки эффективности и целесообразности внедрения проекта на предприятия. Но для того, чтобы выявить место данного проекта на стадиях внедрения инноваций, нужны дополнительные исследования. Поэтому на данном этапе работ представляется возможным ограничиться расчетами, представленными в следующем параграфе.

3.1.2. Затраты на материалы

Исследования проводились в Уральском центре коллективного пользования "Современные нанотехнологии" Уральского федерального университета. Согласно открытым источникам[29] (сайт УЦКП СН УрФУ) расчет стоимости услуг включает в себя затраты на материалы, которые в свою очередь включают в себя стоимость сырья, основных и вспомогательных материалов (по оптовой цене).

$$Z_M = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot C_i) - \sum_{j=1}^m (O_j \cdot C_{oj}) \quad (4)$$

где P_i - расход i -го вида материалов, кг, м;

O_j – количество утилизируемых отходов, кг, м;

C_i – цена i -го материала с учетом транспортно-заготовительных расходов и НДС, руб./кг, м;

C_{oj} – цена j -го вида утилизируемых отходов, руб./кг, м.

Утилизированные отходы при проведении исследования отсутствовали.

Затраты на материалы приведены в таблице 9.

Таблица 9. Затраты на материалы

Наименование материалов	Единица измерения	Количество израсходованного сырья, ед.	Цена руб./ед.	Сумма руб.
Металл:				
Жаропрочная сталь ХН60ВТ	кг	0,08	42000	3360
Металлическое напыление ПВ-НХ16Ю6Ит	кг	0,01	4900	490
Наждачная бумага (фракция 1200)	шт.	1	20	20
Итого				3870

3.1.3. Затраты на электроэнергию

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$Z_3 = \sum_{i=1}^n M_i \cdot K_i \cdot T_i \cdot C, \quad (5)$$

где M_i – паспортная мощность i -го электроприбора или электроустановки, кВт;

K_i – коэффициент использования мощности i -го потребителя электроэнергии (0,7-0,9);

T_i – время работы i -го потребителя электроэнергии за весь период исследования, ч;

C – цена 1 кВт·ч электроэнергии, руб.; $C=3,96$ руб.

Результаты расчета приведены в таблице 10.

Таблица 10. Расчет затрат на электроэнергию

Наименование потребителя электроэнергии	Паспортная мощность потребителя, кВт	Коэффициент использования мощности, доли ед.	Число часов работы, ч	Цена электроэнергии руб/кВтч	Сумма затрат, руб
Автоэмиссионный растровый электронный микроскоп Merlin	4,4	0,7	10	3,96	121,96
Сканирующий электронный микроскоп CarlZeiss AURIGA CrossBeam	3,2	0,9	10	3,96	114,05
Нанотвердомер «НаноСкан-4D»	2,8	0,9	10	3,96	99,8
Источник постоянного тока	0,5	0,6	10	3,96	11,88
Итого					347,69

3.1.4. Затраты на амортизацию

Затраты по статье “Амортизация” ($З_A$) определяются, исходя из стоимости используемого оборудования, приборов, годовых норм амортизационных отчислений и времени их использования (в месяцах) для данного исследования:

$$З_a = \sum_{j=1}^m \frac{C_{обj} \cdot N_j \cdot T_j}{100 \cdot 12}, \quad (6)$$

где $C_{обj}$ – балансовая стоимость j -го оборудования, руб.;

N_j – норма амортизации j -го оборудования, % год.;

T_j – время использования j -го оборудования, мес.

Расчет амортизационных отчислений приведен в таблице 11.

Таблица 11. Расчет амортизационных отчислений

Наименование оборудования	Стоимость оборудования, руб.	Норма амортизации, %	Время использования, мес.	Сумма амортизационных отчислений, руб.
Автоэмиссионный растровый электронный микроскоп Merlin	39 150 000	5	1	1631,25
Сканирующий электронный микроскоп CarlZeiss AURIGA	5 000 000	5	1	208

CrossBeam				
Нанотвердомер «НаноСкан- 4D»	1 741 089	5	1	72,55
Итого				1911,8

3.1.5. Затраты на заработную плату

Затраты на заработную плату определяются исходя из часовой оплаты работников, участвующих в исследовании, и трудоемкости по каждому этапу в отдельности. При этом заработная плата студента принимается в размере стипендии за период участия в эксперименте (1 месяц). Среднечасовая заработная плата рассчитывается путем деления заработной платы за один месяц на 176 часов. В исследовании принимали участие руководитель, консультант и студент.

Расчет затрат на заработную плату приведен в таблице 12.

Таблица 12. Расчет затрат на заработную плату.

Должность и квалификация исполнителя	Оклад, руб.	Затраты времени, час	Средне- часовая зарплата, руб.	Всего затрат на заработную плату, руб.
Руководитель, профессор, д.ф.-м.н.	45000	10	255	2550
Консультант, преподаватель	25000	5	142	710
Студент	3100	10	17,62	176,2
Итого основная зарплата				3976,2

3.1.6. Страховые взносы и расходы по обязательному страхованию персонала от несчастных случаев и профзаболеваний

В эту статью включаются обязательные отчисления по установленным законодательством нормам. Здесь же учитываются расходы по обязательному медицинскому страхованию персонала от несчастных случаев и профзаболеваний. В сумме все отчисления составляют 11% от общих затрат на заработную плату и равны 1192,86 рублей.

Все выше перечисленные элементы затрат сведены в смету затрат и представлены в таблице 13.

Таблица 13. Смета расходов на проведение научно-исследовательской работы

Наименование статей затрат	Сумма, руб.	Уд. вес в общей сумме, %
Материалы	3870	34%
Электроэнергия	347,69	3%
Амортизационные затраты	1911,8	17%
Заработная плата	3976,2	35%
Страховые взносы и расходы по обязательному страхованию персонала от несчастных случаев и профзаболеваний	1192,86	11%
Всего затрат	11298,55	100%

Расчет сметы затрат на проведение исследования показал, что для осуществления экспериментов и их обработки требуется 11298,55 рублей, а основные затраты вносят статьи расходов «Материалы» (34%), «Заработная плата» (35%) и «Амортизационные затраты» (17%).

3.2. Экономическая оценка эффективности исследования

Данная научно-исследовательская работа рассматривает проект, который в данный момент находится на стадии фундаментальных исследований. Он выполняется с целью расширения научных знаний, познания явлений и закономерностей их развития. Экономическую эффективность такого исследования в количественной форме определить в настоящее время возможно лишь по нескольким критериям, т.к. его отдельные результаты пока что нельзя выразить показателями общепринятыми для экономических расчетов.

Результаты, полученные в данной дипломной работе, позволят исключить или упростить трудоемкие измерения, а тем самым сэкономят средства, необходимые для проведения этих экспериментов, а именно, материальные ресурсы, электроэнергию, а за счет высвобождения персонала сэкономят средства на заработную плату. Таким образом, данное исследование позволит снизить затраты на выполнение последующих научно-исследовательских работ.

3.2.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Целевой рынок. Исследования, применяемые в дипломной работе, а также полученные результаты могут быть интересны металлургическим предприятиям, выпускающим продукцию, требования к качеству которой постоянно повышаются, энергетическим предприятиям, а также интерес к данным исследованиям, возможно, будет интересен Российскому фонду фундаментальных исследований (РФФИ).

Было проведено «проблемное интервью», как часть маркетингового исследования, которое помогает выявить проблемы потенциальных потребителей. Для этого необходимо было подобрать правильные «открытые» вопросы, которые не будут вводить в заблуждение собеседника, попросить о встрече и пообщаться в деловой обстановке, если нет возможности встретиться – попробовать созвониться.

Исследование проводилось удаленно по телефону среди специалистов по закупкам металлургических предприятий Свердловской и Челябинской областей с целью выяснения проблемы закупок защитных покрытий и общей востребованности данных продуктов.

Содержание интервью:

1. Вы заказывали когда-нибудь изоляционные покрытия для труб?
2. Как Вы заказываете эти покрытия?
3. Расскажите подробнее, когда это было в последний раз и как часто Вы это делаете?
4. На основе каких критериев Вы выбираете поставщиков покрытий?
5. Искали ли Вы аналоги? На Российском или зарубежном рынке?
6. Были ли аналоги, которые устроили вас по качеству и цене?
7. На вашем предприятии когда-нибудь поднимался вопрос о самостоятельном производстве таких покрытий?
8. Можете рассказать чуть подробнее при каких обстоятельствах это произошло?
9. Вы можете сказать, сколько в среднем Вы тратите на такие заказы? Растет ли объем бюджета на заказ таких покрытий?

Было опрошено 5 респондентов, на основании ответов которых можно сделать определенные выводы:

4 из 5 предприятий заказывают материалы для покрытий у сторонних компаний, что означает спрос на данную продукцию; один из основных критериев выбора поставщика – производство в Российской Федерации и оптимальное соответствие цены и качества, также выявлен немаловажный критерий – наличие аттестации у покрытия; 3 из 5 предприятия решают вопрос с собственным производством покрытий для труб, так как считают, что это позволит им сэкономить.

3.2.3. Анализ аналогичных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

В качестве аналогичной разработки рассмотрим сплав ХН60ВТ не имеющего металлического покрытия ПВ-НХ16Ю6Ит.

Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений представлена в таблице 14.

Таблица 14. Оценочная карта для сравнения аналогичных решений.

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	К _а	Б _ф	К _а
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Простота эксплуатации	0,1	5	3	0,5	0,3
2. Безопасность	0,2	4	3	0,8	0,6
3. Функциональная мощность	0,08	5	4	0,4	0,32
4. Доступность	0,12	5	5	0,6	0,6
5. Качество полученных образцов	0,18	5	4	0,9	0,72
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность метода	0,05	5	5	0,25	0,25
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	3	3	0,15	0,15
3. Цена	0,1	5	3	0,5	0,3
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,12	5	3	0,6	0,36
Итого	1			4,7	3,6

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее

слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (7)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Из анализа оценочной карты можно сделать вывод, что предложенное покрытие для труб выгоднее по всем составляющим, так как позволит получать уникальным комплекс механических свойств. Это, в свою очередь, откроет возможности управления характеристиками прочности при использовании исследуемых сплавов в практических целях, а также при создании новых материалов с набором заданных свойств. Покрытие является надежным, полученные образцы высокого качества, что является важной составляющей в конкурентоспособности проекта, а также невысокая стоимость реализации метода благоприятно сказывается на общей картине конкурентоспособности.

3.2.4. SWOT-анализ

С помощью комплексного SWOT-анализа научно-исследовательского проекта были выявлены сильные и слабые стороны проекта, а так же были обнаружены угрозы для проекта. Анализ реализации проекта SWOT представлен в таблице 15.

Таблица 15. Матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Инновационность использования метода.</p> <p>С2. Доступность сырья (стали ХВ60ВТ, порошкового покрытия ПВ-НХ16Ю6Ит);</p> <p>С3. Есть спрос по разрабатываемой теме;</p> <p>С4. Экологичность технологии. Не несет каких-либо вредных воздействий на окружающую среду</p> <p>С5. Невысокая стоимость исходного сырья.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Необходимо четко следовать инструкции;</p> <p>Сл2. Пока что небольшое количество потенциальных потребителей.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры.</p> <p>В2. Использование современного оборудования.</p> <p>В3. Возможность выхода на рынок.</p> <p>В4. Возможность поддержания проекта РФФИ</p>	<p>Результаты анализа матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»</p> <p>1. Возможность использования инновационной инфраструктуры и оборудования позволяет соответствовать заявленной экономичности и</p>	<p>Результаты анализа матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»</p> <p>1. Для более полного анализа возможно использование вспомогательного оборудования;</p> <p>2.Использование инфраструктуры и позволяет снизить расходы к минимуму;</p>

	<p>энергоэффективности.</p> <p>2.Современное оборудование не наносит вредных воздействий на окружающую среду.</p> <p>3.Использованная методика позволяет получать образцы высокого качества;</p> <p>4.Возможность использования оборудования для других проектов, нет каких-либо ограничений;</p> <p>5.Дополнительное государственное финансирование</p>	<p>3. Для выхода на рынок необходима мощная маркетинговая группа и хорошая рекламная кампания.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Появление новых конкурентов;</p> <p>У2.Появление производителей с более развитыми технологиями и низкими издержками;</p> <p>У3.Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства;</p> <p>У4.Изменения направления работы лаборатории.</p>	<p>Результаты анализа матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»</p> <p>1.Небольшие издержки изготовления образцов;</p> <p>2.Благодаря государственному финансированию затраты компенсируются;</p> <p>3.Высокое качество полученных образцов и подробный анализ, а также трактовка</p>	<p>Результаты анализа матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»</p> <p>1.Несвоевременное финансовое обеспечение исследования со стороны государства может усложнить процесс перехода к массовому производству;</p> <p>2.Угроза несвоевременной поставки необходимых материалов;</p>

	<p>механизмов протекающих в них, повышают конкурентоспособность нашего проекта;</p> <p>4.Высокая компетентность и выполнение поставленных задач в срок позволяет привлечь дополнительное финансирование</p>	
--	---	--

3.2.5. Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в таблице 16.

Таблица 16. Оценка степени готовности научного проекта к
коммерциализации

№	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	5	5
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	5	5
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	3	3
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	4
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	4	3
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	3	3
9	Определены пути	3	3

	продвижения научной разработки на рынок		
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	5
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	4	5
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	4	5
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	3
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	3
15	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	ИТОГО БАЛЛОВ	57	60

Из таблицы можно сделать вывод, что степень проработанности научного проекта выше среднего, такой средний показатель вызван в основном из-за того, что работа больше выполняется, как научно-исследовательская и пока что не нацелена на реализацию полученных результатов для рынка. Уровень знаний у разработчика выше среднего, но

для успешной реализации на ранке необходима дополнительная проработка всех аспектов, связанных с коммерческой стороной проекта.

3.2.6. Оценка сравнительной эффективности исследования

Показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат двух (или более) вариантов исполнения научного исследования.

Таблица 17. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1
1. Сложность технологии	0,1	4	3
2. Качество полученных изделий	0,4	5	3
3.Энергосбережение	0,3	5	5
4.Материалоемкость	0,2	5	4
Итого	1	4,9	3,8

Исходя из всех выше проведенных расчетов, можно сделать вывод, что проект выгоден и является перспективным, но т.к. он находится на этапе научной разработки, то общий финансовый показатель рассчитать на данном этапе невозможно. Но проект является конкурентоспособным и имеет отличные показатели с точки зрения ресурсоэффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы было проведено металлографическое исследование микроструктуры биметаллических образцов, методом наноиндентирования измерены твёрдость HV и модуль Юнга E покрытия, основного металла и металла до нанесения покрытия.

Химические, физические и механические свойства суперсплавов на основе никеля Ni-25%Cr-15%W активно исследуются [30-33]. Обсуждается роль добавок углерода для стабильности микроструктуры [30], влияние карбидов на механические свойства [31-33].

Полученные результаты обсуждаются с позиций современных представлений о физике, химии и механике суперсплавов Ni-25%Cr-15%W с жаропрочным покрытием из сплава Ni-Cr-Al.

Выполненные исследования носят прикладной характер и направлены на решение актуальных задач практической металлургии, в частности на выяснение механизмов, которые позволят управлять наиболее важными технологическими и служебными свойствами антикоррозионных покрытий: прочностью, пористостью и т.п.

В дипломной работе объектами исследования служили актуальные с практической точки зрения сплавы Ni-25%Cr-15%W и Ni-Cr-Al. В частности:

1. Найдено наличие зеренной структуры с ярко выраженными сегрегациями углерода, кислорода, алюминия, хрома, кремния и железа на границе напыленного слоя и основного металла;
2. Установлено, что сегрегации атомов Fe, Si и C на границе покрытия и основного металла могут свидетельствовать об образовании кристаллов силицида железа Fe_2Si , карбидов FeC и SiC, также удалось обнаружить включения Al_2O_3 на границе покрытия и основного металла.

3. Рассчитаны значения твердости для покрытия $5,29 \pm 1,58$ ГПа, основного металла $3,88 \pm 0,17$ ГПа и металла до нанесения покрытия $4,64 \pm 1,05$ ГПа, модуль Юнга $104,46 \pm 15,36$ ГПа, $118,74 \pm 4,23$ ГПа, $147,42 \pm 20,76$ ГПа соответственно.

4. С использованием полученных значений твердости HV и модуля Юнга E рассчитана величина адгезии покрытия и подложки $K_{\text{int}} = 3,7 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$ и энергия разрушения покрытия $G_c = 88 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$

Расчет сметы затрат на проведение исследования показал, что для осуществления экспериментов и их обработки требуется 11298,55 рублей, а основные затраты вносят статьи расходов «Материалы» (34%), «Заработная плата» (35%) и «Амортизационные затраты» (17%).

Также выяснено, что проект выгоден и является перспективным, но т.к. он находится на этапе научной разработки, то общий финансовый показатель рассчитать на данном этапе невозможно. Но проект является конкурентоспособным, перспективным и имеет отличные показатели с точки зрения ресурсоэффективности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов Д.Ю. Руководство для подготовки инспекторов по визуальному и измерительному контролю качества покрытий. Екатеринбург: издательский дом «Оригами», 2009. – 202 с.
2. Зуев В. М., Адаскин А.М. Материаловедение (металлообработка). М.: Academia, 2012
3. Морозов Ю.Д. Тенденции развития сталей для газопроводных труб большого диаметра. Тематический сборник научных трудов. ОАО «РосНИТИ». Екатеринбург: АМБ. 2004.
4. Объединенная металлургическая компания // ОМК. [Электронный ресурс]. URL: <https://omk.ru> (дата обращения: 19.02.2019).
5. Трубная металлургическая компания // ТМК. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tmk-group.ru> (дата обращения: 19.02.2019).
6. Группа ЧТПЗ. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.chelpipe.ru> (дата обращения: 19.02.2019).
7. Лякишев Н.П. Энциклопедический словарь по металлургии. — М.: Интермет Инжиниринг. 2000
8. Y. Kurata, H. Tsuji, M. Shindo, H. Nakajima, J. Nucl. Mater. 246 (1997) 196-205.
9. Масленков С.Б. Жаропрочные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1983. 192 с.
10. Афанасьев Н.И., Бушнев Л.С., Мубояджян С.А. Структура и свойства жаростойких покрытий из сплава Ni-Cr-Al-Y // Известия Высших учебных заведений. Физика. 1986. Т. XXIX. №12.
11. Мысик Р. К., Сулицин А. В., Брусницын С. В. Литейные сплавы на основе тяжелых цветных металлов: учебное пособие // Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 140 с.

12. ГОСТ 5632-72 Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки (с изменениями N 1, 2, 3, 4, 5)
13. Вальцев Н.В., Чикова О.А., Рыжков А. Ф. Microstructure and mechanical properties in submicrovolumes of Ni-25%Cr-15%W alloy with Ni-Cr-Al powder coating 2019
14. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства материалов в наномасштабе (обзор) // ФТТ. 2008. Т. 50. № 12. С. 2113–2142.
15. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Метод испытаний. ISO 14577-1:2002 Москва Стандартиформ 2013
16. Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // Journal of Materials Research. 2004. V. 19. №1. P. 3-20.
17. Колобов Ю.Р., Каблов Е.Н., Козлов Э.В., Конева Н.А., Поварова К.Б. Структура и свойства интерметаллидных материалов с наномасштабным упрочнением. М.: ИДМИСиС, 2008. 327 с.
18. Azimi Yancheshmeh D., Esmailian M., Shirvani K. Microstructural and oxidation behavior of Ni-Cr-Al super alloy containing hafnium at high temperature // International journal of hydrogen energy. 2018. V. 43. P. 5365-5373.
19. Ansaria M., Shoja-Razavi R., Barekatb M., Man H.C. High-temperature oxidation behavior of laser-aided additively manufactured NiCrAlY coating // Corrosion Science. 2017. V. 118. P. 168–177.
20. Chyrkina A., Pillai R., Galiullina T., Wessela E., Grünera D., Quadakkers W.J. External α -Al₂O₃ scale on Ni-base alloy 602CA. – Part I: Formation and long-term stability // Corrosion Science. 2017. V. 124. P. 138–149.

21. Щацуков А.Г. Современное представление о возможных механизмах адгезии металлических пленок к различным подложкам // Прикладная физика. 2006. №5. С. 16–21.
22. Chikova O.A., Reznik P.L., Ovsyannikov B.V. Structure and nanomechanical characteristics of Al-Cu-Mg-Si alloy with partly liquated grain boundaries upon heat treatment // Physics of Metals and Metallography. 2016. V. 117. №12. P. 1245-1250.
23. Chikova O.A., Konstantinov A.N., Shishkina E.V., Chezganov D.S. Influence of the microheterogeneity and crystallization conditions of the Al-50%Sn alloy on the mechanical properties of phase components of the ingot // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2014. V. 55. №6. P. 505-508.
24. Хокинг М. Металлические и керамические покрытия. Получение, свойства и применение / М. Хокинг, В. Васантасри, П. Сидки; [пер. с англ.] – М.: Мир, 2000. 518 с.
25. Zhang C., Zhou H., Liu L. Laminar Fe-based amorphous composite coatings with enhanced bonding strength and impact resistance // Acta Materialia. 2014. V. 72 P.239–251.
26. Peng Y., Zhang C., Zhou H., Liu L. On the bonding strength in thermally sprayed Fe-based amorphous coatings // Surface & Coatings Technology. 2013. V. 218. P.17–22.
27. Лунёв В.М., Немашкало О.В. Адгезионные характеристики покрытий и методы их измерения//Физическая инженерия поверхности. –2010. – Т. 8, № 1. – С. 64-71.
28. Витковский И.В., Конев А.Н., Шоркин В.С. Теоретическое определение адгезионных свойств материалов для жидкометаллического blankets термоядерного реактора // Журнал технической физики. 2009. Т. 28 №2. С. 11-16.

29. Расчет стоимости услуг // УЦКП Современные нанотехнологии. [Электронный ресурс]. URL: <https://nanocenter.urfu.ru/ru> (дата обращения: 20.04.2019)
30. Pollock T.M., Tin S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, microstructure, and properties // Journal of Propulsion and Power. 2006. V. 22. №2. P. 361-374.
31. Ou M., Hao X., Ma Y., Liu R., Zhang L., Liu K. Effect of carbon on the microstructure and stress rupture properties of a new Ni-Cr-W-Fe alloy for advanced ultra-supercritical power plants // Journal of Alloys and Compounds. 2018. V. 732. P. 107-115.
32. Tang B., Jiang L., Hu R., Li Q. Correlation between grain boundary misorientation and M₂₃C₆ precipitation behaviors in a wrought Ni-based superalloy // Materials Characterization. V. 78. 2013. P. 144-150.
33. Alabbad B., Li L., Tin S. Controlling the grain boundary morphology and secondary γ' precipitate size distribution in Ni-base superalloys // Journal of Alloys and Compounds. V. 775. 2019. P. 931-941.